

第1章 プール沸騰限界熱流束のメカニズムに関する研究の目的と内容

1-1 まえがき

沸騰現象は人類がはじめて火を手にして以来、誰もが見たことのある身近な現象である。古くは蒸気機関の発明より動力を生む手段として活用され、今世紀に入っては1930年以降、学問の対象として工業的利用価値のあるボイラーや熱交換器等の研究が主に行われてきた。さらに1950年以降、世界的に原子力発電の実用化への方向性が叫ばれると、原子力エネルギーより動力源として蒸気を取り出す冷却水の沸騰限界熱流束発生機構は、安全設計上の必要性から急激な進展を見せた。しかし、沸騰現象は熱と流れそして相変化の介在した複雑な現象ゆえ、沸騰現象の本質についてはまだまだ解明すべきことが多く、伝熱工学をはじめ、極低温工学でのヘリウムの沸騰現象、インクジェット型プリンタ技術等に見られるノズルからのバブリングなど多方面にわたって、現在もなお研究が盛んに行われている。また沸騰は、非常に高い熱伝達を得られるため、工学的な実用を目的として、沸騰熱伝達特性、熱伝達のメカニズム、熱伝達の定量化等の研究が行われ、原子力発電、省エネルギー、先端技術等様々な分野で、工学的に熱機器の性能改善や新技術の発見に応用されてきた。

地球の石油資源の有限性を改めて認識させられる1973年のオイルショック以後、省エネルギー、新エネルギーの開発に関しての積極的な取り組みがなされてきた。特に人間の社会的活動において、莫大な量のエネルギーが消費されると共に、それに伴った排熱が捨てられるが、省エネルギーの推進については、これらの排熱のエネルギーを有効利用しようという考え、また、一次エネルギーを効率よく利用しようという考えに基づき、伝熱促進の研究が、注目されるようになった。そして、現在では排熱の有効利用に関しては、より低温度の熱源からの熱の汲み上げを必要とした伝熱促進技術が、飛躍的に発展し、ヒートポンプシステムを構成する熱交換器に対して、実用化が行われてきた。このように、伝熱促進技術は、省エネルギーの産物といっても過言ではなく、オイルショック以後のエネルギー問題と密接に関係しているといえる。

最近の伝熱促進の研究分野としては、エレクトロニクスの急速な発展による、より集積化された電子デバイスの沸騰冷却技術へと応用されている。特に近年電子機器の冷却に関しては、限界熱流束近傍の沸騰熱伝達領域を使用するようになってきている。そのため、電子デバイスの沸騰冷却に応用できる技術として、限界熱流束近傍の伝熱促進ならびに、微小伝熱面や限定された空間での沸騰伝熱特性についての研究がさかんに行われている。また、その一方で、環境問題、

特に、CO₂、フロン等の排出による地球の温暖化傾向、オゾン層の破壊に対し、世界的に排出規制の声が高まっている。それに伴い、再び、効率の良いクリーンなエネルギーシステムについても検討されている。今後、更に低温度の熱媒体からの熱の汲み上げ、エネルギーシステムの高効率化の実現等、熱工学における伝熱促進の研究課題は、まだまだ多くあり、発展の可能性がある。

現在、特に熱交換器の沸騰伝熱促進に関していえば、THERMOEXCEL 管のように伝熱面の表面を粗くしたり、フィン付き管に代表されるように、単位長さあたりの面積を大きくしたりするような手法がとられ、熱交換器として実用化されている。一方、本研究で紹介する電場を用いることによって流体に作用する効果(EHD 効果)による手法^{(1)~(4)}、ならびに強制対流、振動等の動力を付加して、伝熱促進を実現しようとする手法がある。動力を必要としない前者は受動的な方法 (passive technique) と呼ばれており、動力を必要とする後者は、能動的な方法 (active technique) と呼ばれている。受動的な方法については、技術的には実用化され、成熟しきった感がある。また、電子デバイス等の冷却技術、また、来たるべき二十一世紀に実現が予想される宇宙ステーションのエネルギーシステムについては、信頼性が優先されるため、伝熱制御技術の確立の必要性があるが、これらは受動的な方法での制御方法では難しく、能動的な方法によって行われることが推測される。その中でも、電場による伝熱制御は、制御方法が他の能動的な方法と比較して、電圧の大小のコントロールにより簡単に行うことができるため、技術的に実用化される大きな可能性を持っている。このように、電場の効果による様々な現象は、伝熱の分野で広範囲にわたって応用されることが期待できる。

本研究では、これら電場の効果の基礎研究として、特に沸騰現象の本質的な基礎現象の解明のため、気泡下部液膜内圧力時間変化、気泡下部液膜厚さの時間変化、気泡形状時間変化の計測を行った。これらの実験結果から、静的な沸騰モデルとして既に確立した Zuber モデルをもとに次の様な全く新しい動的な沸騰モデルを作成した。

『上昇蒸気流と液体界面に生じる Helmholtz 不安定波により、気泡下部縦断面方向曲率が増加する。曲率の変化により気泡下部液膜内圧力が変化し、気泡下部への液体の供給または排出が生じ、気泡下部液膜厚さが周期的に時間変化する。Helmholtz 不安定波が現れる液膜厚さが薄い時にのみ、沸騰による熱伝達が生じるため、単位時間あたりの液膜厚さが薄くなる回数に比例して、平均熱流束が変わる』

このモデルは Helmholtz 不安定 1/4 波長分だけで沸騰現象を説明するため、上向き面、下向き面などの多様な沸騰面における沸騰現象を統一的に説明することができる。具体的には限界熱流束近傍の沸騰現象を次の様に説明する。

限界熱流束近傍の核沸騰において、

『伝熱面過熱度の上昇に伴い、気泡が合体し、横方向の直径が Taylor 不安定波長の $1/2$ に至るまでより大きな気泡へと成長する。沸騰は主に気泡下部気液界面によって起こり、気泡内部には上昇蒸気流が生じる。このため気泡側面には Helmholtz 不安定が生じる。これにより次の様な現象が現れる。

1. Helmholtz 不安定によって生じた気液界面の波と気泡下部液膜の気液界面とが気泡下部縁において接点を成す。この接点における角度に応じて、気泡垂直方向断面の気泡下部縁における曲率が変化する。
2. 水平半径方向における、気泡垂直方向断面の気泡下部縁における曲率が変化する事により、接点近辺の表面張力に差が生じる。
3. 表面張力の差は気泡下部液膜内と気泡外液体の間に圧力差を生み出す。
4. 圧力差によって、気泡下部液膜への液体供給及び排出が、Helmholtz 不安定周期で交互に生じる。
5. 気泡下部液膜への液体供給及び排出により、気泡下部液膜厚さは Helmholtz 不安定周期で変動する。
6. 気泡下部液膜厚さは Helmholtz 不安定周期で変動するため、熱流束は気泡下部液膜厚さに反比例して変動する。とくに Helmholtz 不安定周期毎に気泡下部液膜厚さがごく薄くなる領域が存在し、沸騰による熱伝達はこの時に生じている。

さらに核沸騰から限界熱流束に至る仮定で Helmholtz 不安定周期が短くなり、時間割合で気泡下部液膜厚さがごく薄くなる領域が増えるに従い、熱流束が増大する。』

限界熱流束の発生メカニズムについて、

『熱流束の増大にともない蒸気泡内の蒸気流上昇速度が増す。蒸気泡内の蒸気流上昇速度が増すに従い Helmholtz 不安定による気液界面の振幅が大きくなり、気泡下部液膜厚さの変動も増大する。これにより、気泡下部液膜がほぼ乾いた状態になる時間が現れる。このため熱流束はこれ以上増大する事ができなくなる。』

さらに限界熱流束近傍の遷移沸騰領域について、

『限界熱流束を越えてなお伝熱面温度が上昇すると、気泡下部液膜厚さが 0 の時間が現れ、この時間沸騰が起きないため、蒸気泡内の蒸気流上昇速度が減少し、Helmholtz 不安定の振幅は小さくなり、限界熱流束近傍の核沸騰の周期と同程度に長くなる。このため熱流束は、限界熱流束近傍の核沸騰領域とほぼ同じ値を示す。』

遷移沸騰領域においては

『核沸騰時と比べ伝熱面過熱度は高く、温度勾配が急なため伝熱面は乾きやす

く、気泡下部液膜厚さが0になる時間がさらに長くなり、沸騰が生じない時間が増える。蒸気泡内の蒸気流上昇速度が減少し、Helmholtz 不安定周期がさらに長くなり、熱流束は減少する。』

これは沸騰熱流束の時間的変化を実験的、理論的に明らかにした、全く新しい研究である。このモデルを用いる事により、電場による沸騰熱伝達促進及び制御効果(EHD 効果)を初めて解明する事ができた。

1-2 限界熱流束

沸騰が限界熱流束を示す現象は、膜沸騰状態と核沸騰状態の間で、熱伝達の極大値で起こる。限界熱流束値はきわめて大きな値(10^6W/m^2 のオーダー)を有するが、極大値であるため、この値以上に加熱を続ければ伝熱面は高温となり焼ききれることから、Burn out(バーンアウト)熱流束とも言われる。限界熱流束は気泡下部に存在する薄い液膜が乾くことにより起きるが、これにより生じる伝熱性能の低下、または液膜が乾く現象を Dry out(ドライアウト)という。

沸騰熱伝達において限界熱流束が生じる原因は、結局伝熱面上で蒸発に要する液が不足し、それ以上熱流束が上げられないことにある。この液不足がどのようにして起こるか、またその伝熱機構から、限界熱流束がどのようになるかについては、これまで多くの研究がなされてきた。このうち本研究でも扱うプール沸騰は、流動沸騰に比べ現象が分かりやすく、伝熱機構や熱流束の関係式は多数発表されている。

1-3 現在ある限界熱流束における沸騰現象のモデル

現在、限界熱流束近傍の沸騰メカニズムについては、Zuber モデル⁽⁵⁾、原村・甲藤モデル⁽⁶⁾などの代表的モデルが提案されている。

Zuber モデルは、Taylor 不安定と Helmholtz 不安定による蒸気柱の蒸気の速度が限界に達し、限界熱流束が発生するというモデルであり、原村・甲藤モデルは気泡下部の液膜に微少な蒸気茎を仮定し、蒸気茎の蒸気と液膜との Helmholtz 不安定により液膜厚さを決定し、伝熱面上で気泡離脱までの時間と、その液膜が乾くまでの時間が一致したときに限界熱流束が発生するというモデルである。

また、近年 Dhir らは、これら二つのモデルをもとに気泡下部液膜厚さを考慮した沸騰熱伝達モデル⁽⁵⁾を提案している。このモデルは、「気泡はキャビティから成長し、限界熱流束近傍において気泡の直径が最大値になった時に安定形態をとる。気泡下部液膜の蒸発が茸状気泡を支えていて、気泡は制止しており、気泡柱周辺の流れや熱過程は定常状態で起こる。気泡が安定状態にあるとき、茸状気泡の気液界面の側壁が伝熱面と直角を成しているとして、液膜への液体

供給を作る出す圧力勾配は、気泡柱周方向半径が変わることによって生じる。壁面過熱度があがると蒸発速度が増し、毛細管力は短い濡れ面長さに必要な分の流入量を維持することしかできない。このことにより、「限界熱流束に達する」というものである。

Zuber モデルは、静的なモデルで複雑な沸騰現象の時間的変化の挙動を説明できない。また原村・甲藤モデル及び Dhir モデルは、上向き面、下向き面など多様な伝熱面における沸騰現象を統一的に説明することのできるモデルであるが、これまでの我々の実験では、気泡下部に微小な蒸気茎の存在を確認することができなかった。

著者らは電場を用いた沸騰限界熱流束の増加を実現しているが、これらのモデルにおいて、上向き面の伝熱面の場合には、Zuber モデルが電界中の沸騰限界熱流束の増加を、よく説明することができる。一方、原村・甲藤モデル及び Dhir モデルでは、気泡下部の液膜厚さにより限界熱流束が決定されるが、気泡下部は電場の効果が影響しない。よって、この気泡下部の蒸気茎の状態は変わらないため、限界熱流束の増大を説明できない。また、熊田らのモデル⁽⁷⁾も液膜厚さの変動に対する電場の効果などの説明がつきにくい。

また、限界熱流束の発生メカニズム解明の第一歩として、限界熱流束時、遷移沸騰時の気泡下部液膜の測定が実験的に行われている。実験的な気泡下部液膜の測定は、主に探針による方法^{(8)~(10)}により測定されているが、その計測値が気泡の滞留時間内に蒸発するには厚過ぎるとして、疑問視する研究者も多い。

1-4 本研究の目的と概要

本論文の構成にあたっては、次の5章から成り立っている。

第1章「沸騰限界熱流束のメカニズムに関する研究の目的と内容」では、これまでの沸騰に関する研究と工業的な実用化の流れについての概略を述べ、沸騰メカニズムを探る新たな伝熱制御技術の必要性を示した。今後の研究の方向性として重要な伝熱制御技術について、上昇蒸気流と液体界面に生じる Helmholtz 不安定をコントロールする事が有効であり、特に EHD 的な伝熱促進方法が、その発展の可能性の大きい事を示した。なお本研究に用いる作動流体は HCFC-123、代替フロンである。

第2章「沸騰限界熱流束近傍の気泡下部液膜内圧力変動の測定」では、沸騰限界熱流束発生メカニズム解明の重要なステップとして、沸騰限界熱流束近傍の蒸気柱下部液膜圧力変化の測定を、新しく作成した微小高速応答圧力センサーで行った。核沸騰領域から限界熱流束に至る過程において、沸騰蒸気泡下部には常に薄い液膜が存在する事が知られており、その液膜への液体流動が沸騰のメカニズム解明、さらには沸騰限界熱流束発生メカニズム解明には不可欠と考

えられる。本研究では、新しく作成した微小高速応答圧力センサーを沸騰伝熱面内部に埋め込み、沸騰現象に影響を与える事無く、沸騰限界熱流束近傍の気泡下部液膜内圧力変動の測定を行った。

第3章「沸騰限界熱流束近傍の気泡下部液膜厚さ変動の測定」では、第2節～第4節までは、面状静電容量プローブを用いた気泡下部液膜厚さの絶対値の測定について述べる。液膜厚さの絶対値測定は、気泡下部液膜への液体流動が沸騰のメカニズム解明、さらには沸騰限界熱流束発生メカニズムを解くカギと考えられる。第5節には、気泡形状の時間変化と、液膜厚さの時間変化の同時計測について述べる。針状静電容量プローブを用い、気泡下部液膜厚さの変化を測定すると同時に、高速度ビデオカメラを用いて気泡形状変化を撮影して、気泡形状変化と気泡下部液膜厚さの変化の関係を明らかにした。なお解析結果については第4章に述べる。第6節では液膜内圧力の時間変化と、液膜厚さの時間変化の同時計測について述べる。液膜内圧力測定には第2章で用いた微小高速応答圧力センサーを用いた。液膜厚さ測定には第3章、第2節～第4節で用いた面状静電容量プローブを使用した。

第4章「沸騰限界熱流束のメカニズムのモデル化」では第4章、第5節及び第6節の結果から、気泡形状変化、気泡下部液膜内の圧力変化、気泡下部液膜厚さの変化の関係を説明した。この関係を元に、次の様な定性的なプール沸騰限界熱流束近傍の沸騰メカニズムのモデルを作成する。

『上昇蒸気流と液体界面に生じる Helmholtz 不安定波により、気泡下部縦断面方向曲率が変わる。曲率の変化により気泡下部液膜内圧力が変化し、気泡下部への液体の供給または排出が生じ、気泡下部液膜厚さが周期的に時間変化する。Helmholtz 不安定で現れる液膜厚さが薄い時にのみ、沸騰による熱伝達が生じるため、単位時間あたりの液膜厚さが薄くなる回数に比例して、平均熱流束が変わる』

このモデルにより、この沸騰メカニズムのモデルを用いて、沸騰限界熱流束の増大を目指す。特に伝熱制御技術として、上昇蒸気流と液体界面に生じる Helmholtz 不安定をコントロールする事が有効であり、EHD 的な伝熱促進方法が、有効であり、その発展の可能性の大きい事を示す。

第5章「沸騰熱伝達の EHD 的研究」では電場を用いた沸騰伝熱促進の技術を示す。蒸気泡上部から電場を与える事により、上昇蒸気流と液体界面に生じる Helmholtz 不安定周期を短くすることができ、これによって沸騰伝熱促進できる。本研究では、この効果を第4章で示した新しい沸騰メカニズムを用いて説明し、実験結果と一致することを示す。

第6章「結論」ではここに述べてきた、新しい「プール沸騰限界熱流束のメカニズム」モデルをまとめ、EHD 効果を述べる。

プール沸騰限界熱流束のメカニズム解明

静的な Zuber モデル「Taylor 不安定波長ごとに蒸気泡は発生し、蒸気泡側面には Helmholtz 不安定が生じる」を元に、『Helmholtz 不安定周期の長短が沸騰熱流束を変化させる』という、動的なモデルを作成

実験的解析

気泡下部液膜内の圧力、液膜厚さ、気泡全体形状の三つの時間変化を測定、気泡形状変化→圧力変化→液膜厚さ変化 の関係を明らかに

理論的解析

Helmholtz 不安定による気泡下部曲率半径変化から、気泡下部液膜内の圧力及び液膜厚さの時間変化を算出

伝熱促進への応用

Helmholtz 不安定を電場の印加で制御し (EHD 効果)、熱流束の制御及び伝熱促進を実現できる事を理論的に示す



2kV/cm



4kV/cm

Fig.1 Research flow chart